

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170103

柳艺博, 胡正华, 李琪, 张雪松, 张琪. 北方地区叶面积指数变化对蒸散和产水量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1206–1215

Liu Y B, Hu Z H, Li Q, Zhang X S, Zhang Q. Effect of leaf area index change on evapotranspiration and water yield in northern China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(8): 1206–1215

北方地区叶面积指数变化对蒸散和产水量的影响*

柳艺博¹, 胡正华^{1,2**}, 李琪¹, 张雪松¹, 张琪¹

(1. 南京信息工程大学应用气象学院/江苏省农业气象重点实验室 南京 210044; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报
预警与评估协同创新中心 南京 210044)

摘要:越来越多的证据表明伴随植树造林/再造林等工程实施,我国北方地区叶面积指数(LAI)近年来变化明显。但有关植树造林等引起的 LAI 变化对水循环的影响仍存在争议。本研究利用卫星遥感 LAI 数据和生态过程模型(BEPS)评价了 2000—2014 年北方地区 LAI 变化对蒸散和产水量的影响。首先评价了北方地区 LAI 的变化趋势;在此基础上采用“去趋势”法去除 LAI 变化趋势而仅保留其年际变化;而后分别基于原始和去趋势后 LAI 序列驱动 BEPS 模拟北方地区蒸散;最后基于两种情景比较分析 LAI 变化对蒸散和产水量的影响。结果表明,北方地区 LAI 发生显著变化的地区占北方地区面积的 20.2%,其中 LAI 显著升高和显著降低地区面积分别占 18.8%和 5.5%。在像元尺度上, LAI 升高会促进蒸散并降低产水量, LAI 降低则相反。在区域尺度上, LAI 升高分别对蒸散和产水量产生了显著的正负效应; LAI 变化对水循环影响取决于研究区覆盖范围和研究区内 LAI 升高和降低的比例。考虑到 LAI 升高对产水量可能产生的负效应和北方地区的缺水危机,未来植树造林活动或许应该考虑更多集中于南方地区。

关键词: 叶面积指数; 蒸散; 产水量; 生态过程模型; 北方地区

中图分类号: TP79; P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)08-1206-10

Effect of leaf area index change on evapotranspiration and water yield in northern China*

LIU Yibo¹, HU Zhenghua^{1,2**}, LI Qi¹, ZHANG Xuesong¹, ZHANG Qi¹

(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology / Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: There has been growing evidence that leaf area index (LAI) has changed in many parts of northern China, including northeast (NER), north (NR), northwest (NWR) and Huanghuaihai (HHH) regions. Changes in LAI can alter hydrologic cycle by regulating matter and energy cycles. However, the effects of the changes in LAI, particularly for afforestation / reforestation, on the hydrologic cycle have remained controversial. Better understanding on how the changes in LAI affect evapotranspiration (ET) and water yield has implications for ecohydrology, and regional and national afforestation / reforestation policies. In this study, we used satellite-derived LAI dataset and process-based ecosystem model (Boreal Ecosystem Production Simulator, BEPS) to examine how changes in LAI affect annual ET and water yield in northern China during the period 2000–2014. Firstly, LAI dataset was used to

* 公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-6)和国家自然科学基金项目(41401218)资助

** 通讯作者: 胡正华, 研究方向为农业气象。E-mail: zhhu@nuist.edu.cn

柳艺博, 研究方向为陆地生态系统碳水循环。E-mail: yiboliu2012@163.com

收稿日期: 2017-02-08 接受日期: 2017-03-23

* This study was supported by the China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Major projects) (GYHY201506001-6) and the National Natural Science Foundation of China (41401218).

** Corresponding author, E-mail: zhhu@nuist.edu.cn

Received Feb. 8, 2017; accepted Mar. 23, 2017

assess linear trends in LAI per pixel. Secondly, increasing and decreasing trends in LAI were removed on per-pixel basis by detrending LAI. Thirdly, we used the BEPS model along with the original and detrended LAI datasets to conduct two model simulations — one with original LAI (i.e., with increasing and decreasing trends in LAI) and one with detrended LAI (i.e., without trends in LAI). Finally, the two model simulations were conducted to assess the effects of increasing and decreasing LAI on terrestrial ET and water yield in northern China. Results showed significant trends in LAI for 20.2% of area of northern China, with increases and decreases in area accounted for 18.8% and 5.5%, respectively. Annual mean LAI averaged at the regional scale significantly increased for NR (0.0014 a^{-1} , $P < 0.05$) and NWR (0.0047 a^{-1} , $P < 0.001$). Temporal trends in LAI were not significant for NER and HHH. Two model simulations driven by original and detrended LAI, respectively, showed that the effects of the changes in LAI on terrestrial ET and water yield varied with spatial scale. At pixel scale, an increase in LAI increased annual ET but decreased water yield or weakened increase in water yield. However, a decrease in LAI decreased ET and increased water yield or weakened decrease in water yield. At regional scale, increase in LAI had positive effects on annual ET, but negative effects on water yield. Annual ET averaged at regional scale significantly increased in NR ($3.5\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, $P < 0.0001$) and NWR ($2.1\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, $P < 0.05$). The difference in annual ET between the two simulations exhibited significant increase in the trends in all the 4 regions. Difference in water yield between the simulations with original and detrended LAI had decreasing trends for NWR ($-0.95\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, $P < 0.0001$), NER and NR ($-0.38\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, $P < 0.0001$) and for HHH ($-0.11\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, $P < 0.001$). Future studies on the effects of the changes in LAI on hydrological cycle should account for feedbacks of the changes in ET and other biophysical properties (e.g., albedo) to the climate. Given the negative effects of increasing LAI on water yield and the water crisis in northern China, afforestation efforts should perhaps focus on southern China.

Keywords: Leaf area index; Evapotranspiration; Water yield; Ecological process-based model; Northern China

越来越多的基于卫星遥感观测提取的归一化植被指数(NDVI)或叶面积指数(LAI)研究表明, 包括中国在内的北半球中高纬度的很多地区近 30 多年来植被“绿度”(植被覆盖度与生产力)呈升高趋势^[1-2]。植被“绿度”的变化会通过调节物质和能量循环来改变水量平衡^[3]。植被覆盖度或生产力变化通常主要通过改变冠层截留、蒸发和蒸腾(即蒸散)等过程来影响水循环。然而, 有关植被“绿度”增加尤其是植树造林等活动对水循环造成的影响仍存在较大争论^[4]。一些研究指出植树造林/再造林会减少可用水量^[5-8]。小流域的流域配对试验表明森林覆盖度升高会增加森林冠层截留和蒸散, 从而减少径流并导致可用水量下降^[7,9]。与此相反, 其他一些区域尺度研究则表明森林覆盖度升高可促进水汽的大范围传输, 提升区域乃至全球尺度的降水, 森林覆盖度增加对水循环具有正效应^[10-11]。有关植树造林/再造林等对产水量的影响仍需明晰。

我国造林面积居世界第一。为减缓环境退化, 自 20 世纪 50 年代以来, 中国政府开始大范围的植树造林/再造林等生态恢复工程, 包括在北方地区(东北、北部、西北和黄淮海)开展的诸如“三北防护林体系工程”、“天然林资源保护工程”、“退耕还林还草工程”等^[12-16]。这些造林活动减缓了水土流失和生态退化, 促进了 CO_2 吸收, 有效地改善了自然生态环境。但植树造林等所引起的植被“绿度”变化对区域尺度上径流(产水量)的影响还未有一致结论。一些已有研究表明植树造林和生态系统恢复引起的植被覆盖度增加会减少径流^[17-18]。例如, 基于水文模

型模拟研究表明造林会使黄土高原地区平均产水量降低 50%^[19]。Xie 等^[20]则指出植树造林对我国“三北地区”水循环所产生的影响几乎可以忽略。探讨 LAI 变化对我国北方地区蒸散和产水量的影响尤为迫切。

本研究利用卫星遥感 LAI 数据和生态过程模型研究 2000—2014 年间北方地区 LAI 变化对蒸散和产水量的影响。首先评价了北方地区 LAI 的变化趋势; 在此基础上采用“去趋势”法去除 LAI 变化趋势而仅保留其年际变化; 而后分别基于原始 LAI 序列和去趋势后 LAI 序列驱动生态系统过程模型模拟北方地区蒸散; 最后基于两种情景比较分析 LAI 变化对蒸散和产水量的影响, 以期为区域乃至国家植树造林/再造林政策的实施提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

本研究中涉及的北方地区包括东北、北部、西北和黄淮海等 4 个地区。东北地区包括黑龙江、吉林、辽宁 3 省; 北部地区包括内蒙古和山西 2 省; 西北地区包括甘肃、宁夏、陕西 3 省; 黄淮海地区包括北京、天津、河北、河南、山东、江苏和安徽等 7 省市。北方地区面积广大, 地形复杂, 不同地区的气候特征存在较大差异, 包括了我国大部分的干旱和半干旱地区^[21]。2000—2014 年东北、北部、西北和黄淮海等 4 个地区的年降水量变化趋势分别为 $8.6\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $6.3\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $3.5\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $-3.9\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。我国进行大范围的植树造林/再造林等生态恢复工程等主要集

中于这些地区。研究北方地区 LAI 变化对水循环影响具有一定的代表意义。

1.2 蒸散和产水量模拟

本研究利用遥感驱动的生态过程模型 BEPS(boreal ecosystem production simulator)对北方地区蒸散进行模拟^[22]。BEPS 模型把冠层分为阳叶和阴叶两部分,通过积分将瞬时的单叶片尺度模型升至冠层日尺度,从而实现区域尺度碳水循环过程模拟^[23]。BEPS 模型将大气降水、冠层截留、林下降水、冠层蒸腾和蒸发、雪融、雪的升华、土壤蒸发、地表和地下径流、下渗及土壤水分变化等水文过程都考虑在内^[24-25]。生态系统蒸散包括了植被冠层阴阳叶蒸腾、土壤表面蒸发以及植被冠层截留等^[25]。该模型已被广泛用于不同类型陆地生态系统水文过程研究^[26-29]。

LAI 是 BEPS 模型中的重要驱动输入。本研究采用由 MODIS 地表反射率数据(MOD09A1 V05)和 MODIS 地表覆被类型数据(MCD12Q1 V051)驱动基于 4 尺度几何光学模型的 LAI 反演算法生成的 2000—2014 年每 8 d 的 500 m 空间分辨率 LAI 驱动 BEPS 模型和探究 LAI 的变化^[28,30]。基于 4 尺度几何光学模型的 LAI 反演算法的主要特点是通过考虑太阳天顶角-传感器天顶角-太阳与传感器之间相对方位角变化对反射率和 LAI 与植被指数之间关系的影响来反演 LAI^[31]。在加拿大和中国等地区的验证表明,基于该算法生成的 LAI 产品质量要优于 MODIS LAI。

除 LAI 外, BEPS 模型的主要驱动输入还包括大气 CO₂ 浓度数据、土壤数据和地表覆被类型数据和气象要素数据等。1)气象要素数据是对 2000—2014 年北方地区内国家基准气象站的逐日最高气温、最低气温、降水量、相对湿度和日照时数等数据采用反距离权重法进行空间插值^[28],生成覆盖研究区的 500 m 空间分辨率的逐日气象要素场数据。2)地表覆被类型数据采用 2001—2014 年间逐年 MODIS 地表覆被数据集(MCD12Q1 V051) (500 m 分辨率)^[32]。考虑到缺乏 2000 年数据,选用 2001 年地表覆被类型替代。3)土壤数据采用包含砂粒、黏粒、粉粒的体积百分比数据,该数据以中国 1:1 000 000 土壤图和全国第 2 次土壤调查中 8 595 个土壤质地剖面数据为基础,采用多边形链接方式,生成 0.008 33 的分布图(重采样为 500 m)^[33]。

基于区域尺度内一年的土壤储水量变化可以忽略的假设,本研究中的像元和区域尺度的产水量定义为年降水量和模型模拟的蒸散(ET)之差^[19]。

1.3 LAI 变化对蒸散和产水量影响评价

为评价 LAI 变化对蒸散和产水量影响,借鉴已有研究^[34]对发生显著变化的 LAI 像元序列进行去趋势处理。去趋势处理可以保持 LAI 的年际间变化,而将其随时间变化的线性趋势予以去除^[34]。首先采用线性回归模型计算年均 LAI 在 2000—2014 年的变化趋势:

$$y = at + b \quad (1)$$

式中: y 为年均 LAI, t 为时间(年), a 和 b 分别为斜率和截距。对于发生显著变化($P < 0.05$)的 LAI 像元根据年均 LAI 和时间决定的线性回归关系来实现年均 LAI 变化趋势的去除:

$$y_r = y - \hat{y} \quad (2)$$

式中: y_r 为去趋势 LAI(即线性拟合的残差), y 为原始 LAI, \hat{y} 为根据式(1)拟合得到的 LAI。根据去趋势 LAI 序列 y_r , 可生成新的 LAI 序列:

$$y_n = y_{2000} + y_r \quad (3)$$

式中: y_n 为新的年均 LAI, y_{2000} 为 2000 年的年均 LAI。

新的年均 LAI 序列(y_n)保留了年均 LAI 的年际变化但不存在线性趋势变化。在此基础上,根据每 8 d 的 LAI 与年均 LAI 的比值将每年的残差 y_r 按比例分配到每 8 d LAI 序列中,得到去趋势后每 8 d 的 LAI 序列。

利用原始和去趋势后的每 8 d LAI 序列分别驱动 BEPS 模型模拟 2000—2104 年北方地区陆地生态系统 ET, 得到两种情景 ET(即原始 ET 和去趋势 ET)。对每一个像元尺度而言,年蒸散即逐日蒸散累加,产水量($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)计算如下:

$$Y = \text{PRE} - \text{ET} \quad (4)$$

式中: Y 、PRE 和 ET 分别为产水量、年降水量和年蒸散。比较两种不同情景(基于原始 LAI 和去趋势 LAI)模拟的蒸散和产水量即可评价 LAI 变化对水循环的影响。

2 结果与分析

2.1 2000—2014 年间北方地区 LAI 变化

基于 2000—2014 年北方地区年均 LAI 的变化趋势分析表明,15 年间 LAI 发生显著变化的地区占北方地区总面积的 20.2%,其中 LAI 显著升高和降低地区面积分别占 18.8%和 5.5%。东北、北部、西北和黄淮海地区的 LAI 显著升高比例分别为 18.5%、24.9%、25.2%和 15.4%;而 LAI 显著降低比例分别占各区面积的 8.3%、5.6%、1.7%和 9.0%(图 1)。LAI 显著升高的地区主要分布在西北地区东部(黄土高原地区),东北地区西部和黄淮海地区北部(华北平原),增长速度约为 $0.02 \cdot \text{a}^{-1}$ 。LAI 显著下降的地区主

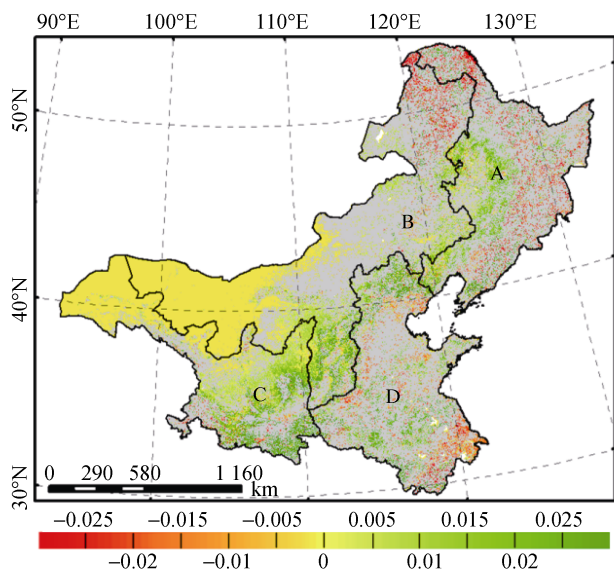


图 1 2000—2014 年北方地区年均 LAI 变化趋势空间分布 [LAI 未发生显著变化 ($P > 0.05$) 区域以灰色表示。A、B、C 和 D 依次为东北、北部、西北和黄淮海地区]

Fig. 1 Trends of annual mean LAI change for the northern China during the period 2000—2014 [The light grey indicates vegetated areas with insignificant trends in annual mean LAI change ($P > 0.05$). A, B, C and D are Northeast, North, Northwest and Huanghuaihai regions of China, respectively.]

要分布在东北地区东部、北部地区北部和黄淮海地区南部和中部零星地区, 下降速度约为 $0.015 \cdot a^{-1}$ 。

4 个地区年均 LAI 的区域均值统计显示, 北部地区和西北地区 LAI 在过去 15 年中分别以 $0.0014 \cdot a^{-1}$ ($P < 0.05$) 和 $0.0047 \cdot a^{-1}$ ($P < 0.001$) 速度显著增长 (图 2)。由于 LAI 升高和降低趋势在一定程度上的相互抵消, 东北地区和黄淮海地区区域平均 LAI 变化不明显。各地区原始 LAI 和去趋势后 LAI 的差值在 2000—2014 年间均呈显著增长 ($P < 0.0001$), 其中, 西北地区增幅最大 ($0.0045 \cdot a^{-1}$), 黄淮海地区次之 ($0.0017 \cdot a^{-1}$), 北部地区和东北地区接近相当 ($0.0011 \cdot a^{-1}$)。

2.2 北方地区蒸散和产水量的空间格局和变化趋势

利用原始 LAI 和去趋势后的 LAI 分别驱动 BEPS 模型评价像元尺度上 LAI 变化对年蒸散和产水量大小和空间格局的影响 (图 3a-d)。通过两种情景模拟的年蒸散和产水量 2000—2014 年的多年均值空间分布比较可以发现, 在像元尺度上 LAI 升高会促进蒸散并降低产水量, 而 LAI 降低则相反。LAI 升高对蒸散贡献较大的地区主要分布在西北地区中东

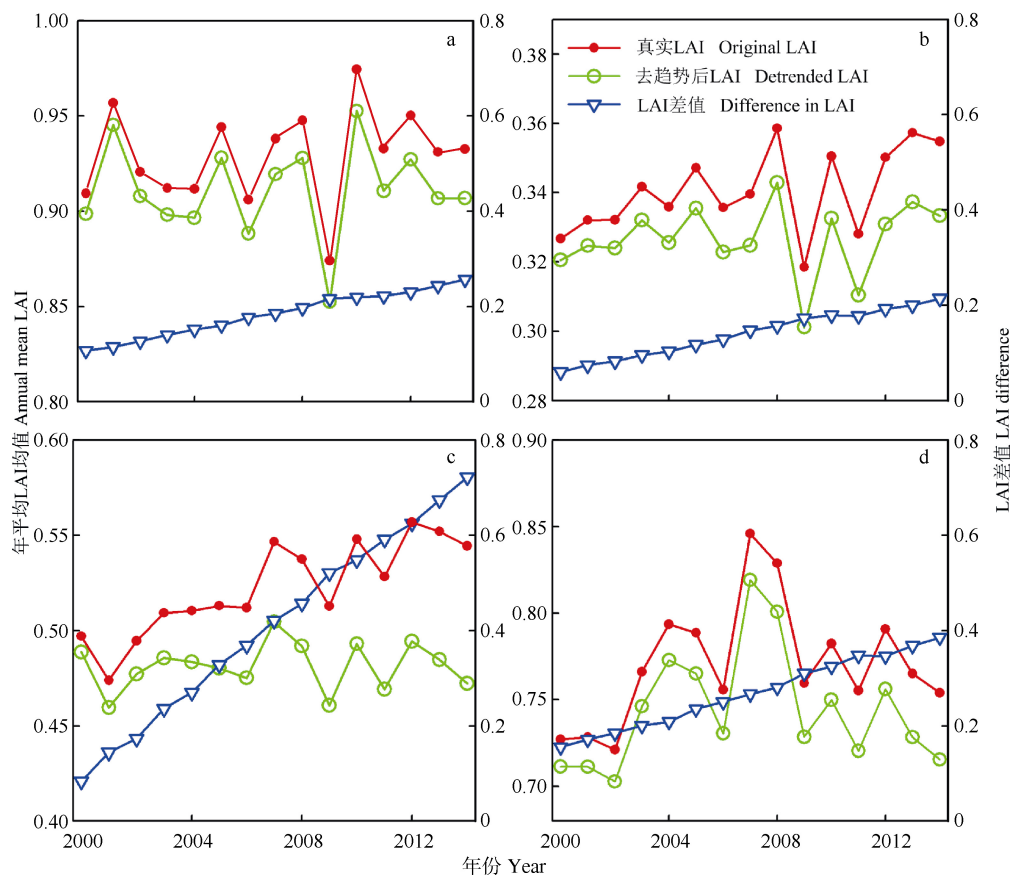


图 2 2000—2014 年间北方地区原始 LAI、去趋势后 LAI 及两者差值的区域均值变化 (a、b、c 和 d 依次为东北、北部、西北和黄淮海地区)

Fig. 2 Spatial-averages of the original LAI, detrended LAI and their difference over the northern China during the period 2000—2014 (Fig. a, b, c and d are Northeast, North, Northwest and Huanghuaihai regions of China, respectively.)

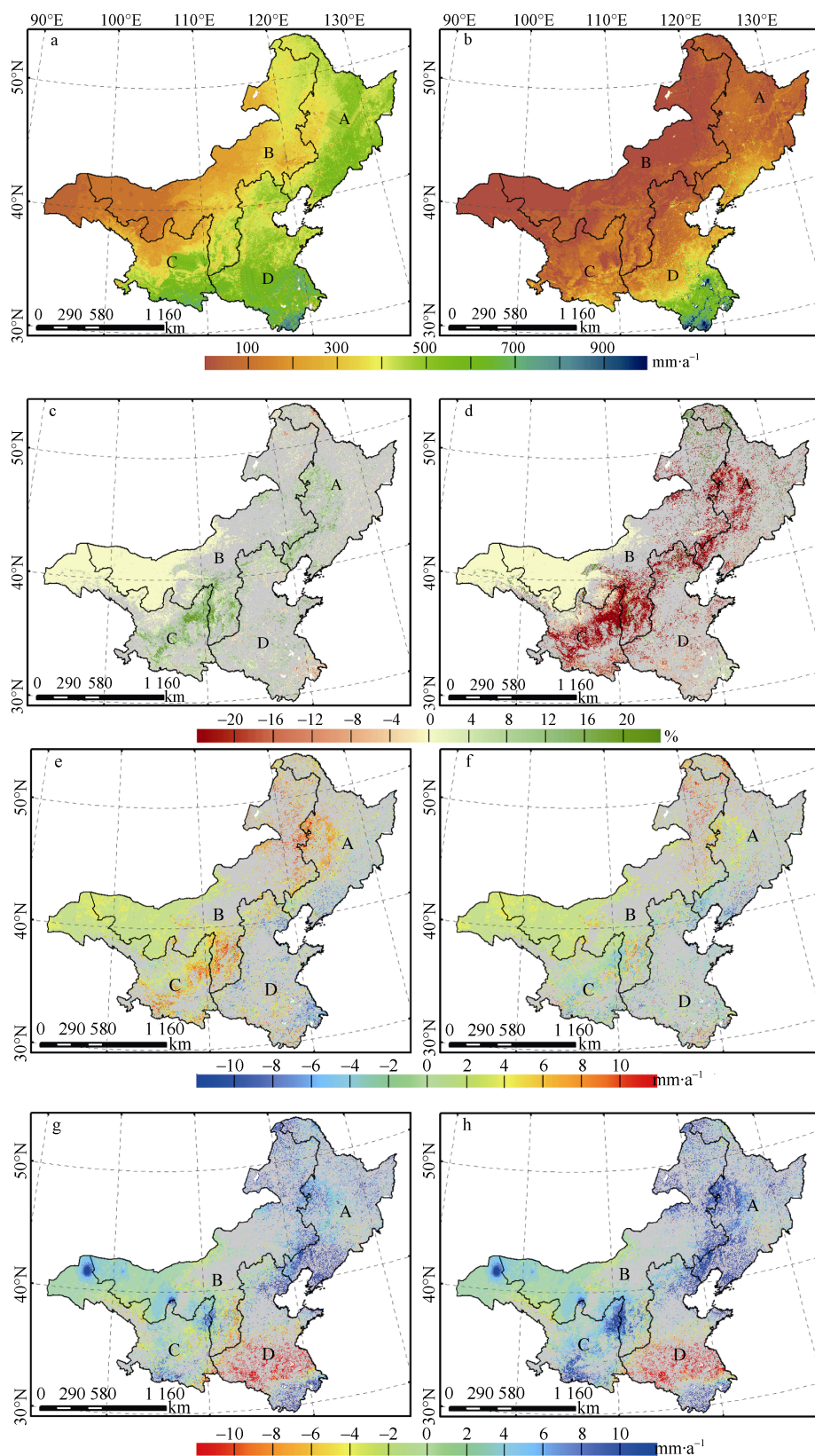


图3 2000—2014年北方地区蒸散、产水量平均值和变化趋势空间分布[a、b为真实状况下的蒸散和产水量多年均值；c、d为LAI变化贡献的蒸散和产水量相对百分比；e、g为真实状况下蒸散和产水量变化趋势；f、h为不考虑LAI变化贡献的蒸散和产水量变化趋势。]

Fig. 3 Spatial distribution of mean and trends of annual ET and water yield in the northern China over the period 2000-2014 (a and b are annual ET and water yield simulated with original LAI; c and d are the relative differences (%) in annual ET and water yield between the two model simulations. e and g are trends of simulated annual ET and water yield with original LAI, respectively; f and h are trends of simulated annual ET and water yield with detrended LAI, respectively.)

部、北部地区南部和东北地区西部等 LAI 明显增长地区(12%~16%)。LAI 显著升高对产水量所产生的影响超过了其对蒸散产生的影响, 北方广大 LAI 升高地区的产水量减少超过 20%。LAI 降低促进产水量主要发生在东北北部、北方地区北部以及黄淮海东部的零星地区, 这些地区 LAI 降低导致蒸散在一定程度上减少。LAI 变化对蒸散和产水量影响在空间格局大体一致, 但方向相反, 且对产水量影响幅度超过蒸散。

2.3 北方地区 LAI 变化对蒸散和产水量影响

基于原始 LAI 和去趋势后 LAI 模拟结果评价了 2000—2014 年北方地区年蒸散和产水量的变化趋势(图 3e-h)。2000—2014 年间北方大部分地区 ET 呈增加趋势, 西北地区 and 东北地区升高尤为明显, 增长速度在 $8 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 左右, 部分地区 ET 年增长率甚至接近 $10 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (图 3e)。与原始 LAI 模拟得到的蒸散变化趋势不同, 去趋势 LAI 模拟得到的蒸散在 LAI 升高地区呈现较小的升高趋势, 而在 LAI 下降

地区呈现较小的下降趋势(图 3f)。受同期降水量升高的影响, 除黄淮海中南部地区外, 广大北方地区产水量呈现升高趋势(图 3g), 其中, 黄土高原北部地区、东北地区南部、东北地区和北方地区相邻地区等产水量增长速度超过 $6 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 零星地区产水量增长甚至超过 $10 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。基于去趋势后 LAI 模拟得到的产水量变化趋势可以看出, 若不考虑 LAI 变化贡献, 以上地区的产水量升高速度会更大(图 3h)。以上分析也说明植树造林等活动引起的 LAI 升高促进了我国北方地区蒸散量, 但却在一定程度上减缓了产水量的升高。

植被 LAI 变化对水循环影响取决于研究区的覆盖范围和研究区内 LAI 升高和降低的比例。在区域尺度上, 2000—2014 年间北部地区($y=3.52x+256.6$, $R^2=0.47$, $P<0.0001$)和西北地区的区域平均年蒸散显著升高($y=2.14x+302.1$, $R^2=0.27$, $P<0.05$), 东北地区 and 黄淮海地区蒸散呈不显著的上升趋势(图 4)。原始 LAI 和去趋势 LAI 模拟的蒸散比较表明, 真实蒸

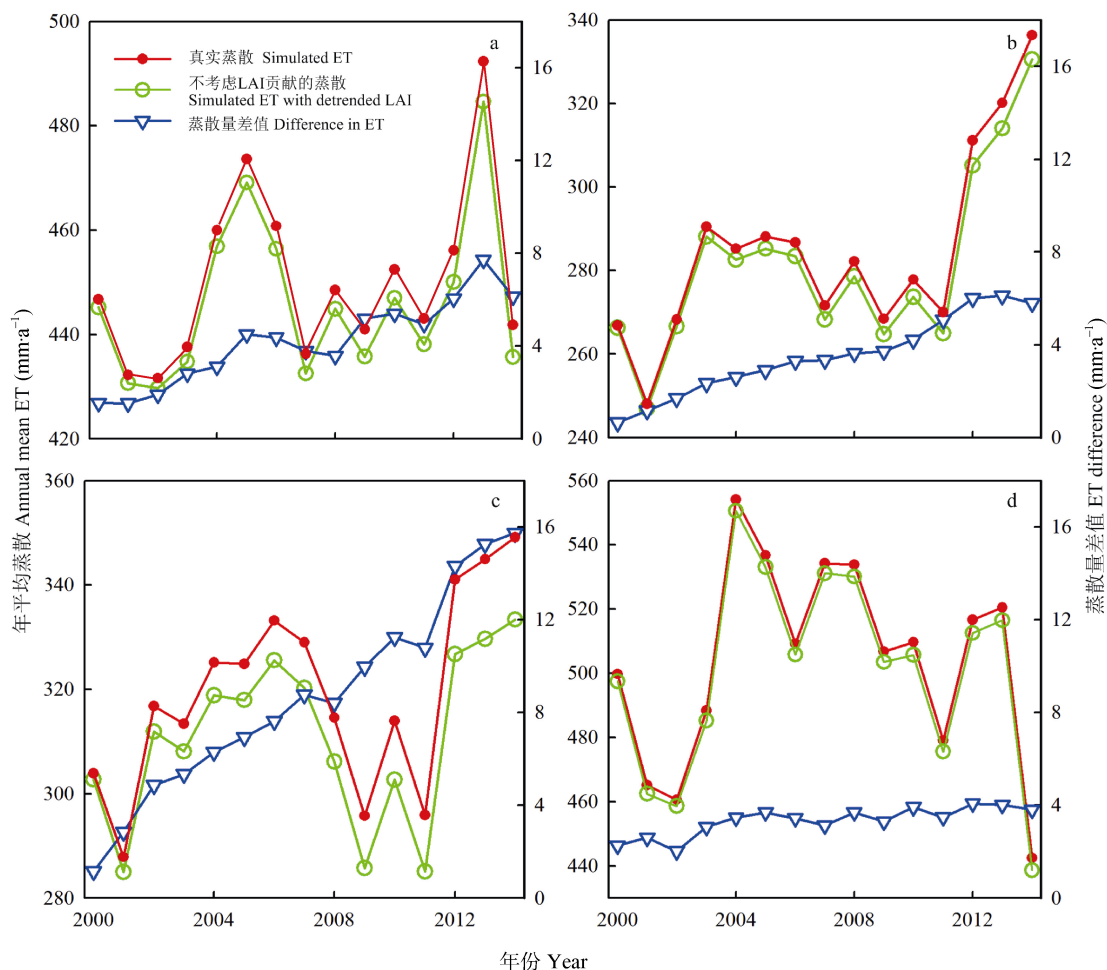


图 4 真实和不考虑 LAI 变化情况下北方地区平均蒸散区域均值的变化趋势(a、b、c 和 d 依次为东北、北部、西北和黄淮海地区)

Fig. 4 Spatial-averages of annual ET, simulated annual ET with detrended LAI and their difference for the northern China during the period 2000–2014 (Fig. a, b, c, d are Northeast, North, Northwest and Huanghuaihai regions of China, respectively.)

散和不考虑 LAI 贡献蒸散之间差值变化趋势在西北地区差异最为明显($0.95 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, $P<0.0001$), 东北地区次之($0.38 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, $P<0.0001$), 黄淮海地区最小($0.11 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, $P<0.001$)。这说明在区域尺度上, 北方地区 LAI 升高促进了年蒸散 ET, 而 LAI 降低减缓年蒸散。随着时间尺度越长 LAI 变化对蒸散影响越明显。

4 个地区产水量的区域均值统计来看, 2000—2014 年间除黄淮海地区产水量呈现不明显的下降趋势外, 其他 3 个地区产水量均呈现不显著的升高趋势(图 5)。LAI 的变化减缓了 4 个地区产水量的增长: LAI 的变化导致真实产水量和不考虑 LAI 贡献产水量之间差值在西北地区差异尤为显著, 减缓的年产量为 $0.95 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ($y=-0.95x-1.0$, $R^2=0.97$, $P<0.0001$); 东北 ($y=-0.38x-1.15$, $R^2=0.88$, $P<0.0001$) 和北部地区 ($y=-0.38x-0.50$, $R^2=0.96$, $P<0.0001$) 次之, 减缓速度约

为 $0.38 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ($P<0.0001$); 黄淮海地区居末, 减缓速度约为 $0.11 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ($y=-0.11x-2.4$, $R^2=0.68$, $P<0.001$)。真实 LAI 和去趋势 LAI 两种情景模拟的 2000—2014 年产量区域均值之差在西北地区最大(9.2%), 北部地区(6.6%)和东北地区(3.3%)次之, 黄淮海地区最小(1.1%)。以上结果表明 LAI 的变化在区域尺度上改变了我国北方地区的产水量变化趋势。

3 讨论与结论

3.1 讨论

很多已有研究表明我国北方地区近年来 LAI 整体呈现升高趋势。LAI 的变化受到环境因素和人为因素的综合影响^[35-36]。北方地区 LAI 升高很大原因归结为“三北防护林工程”、“退耕还林还草工程”等大范围造林项目的实施, 农业管理措施改进以及气候变暖、 CO_2 浓度升高和氮沉降等对植被生长的促进^[35-36]; 而北方地区 LAI 降低则主要是生态系统退

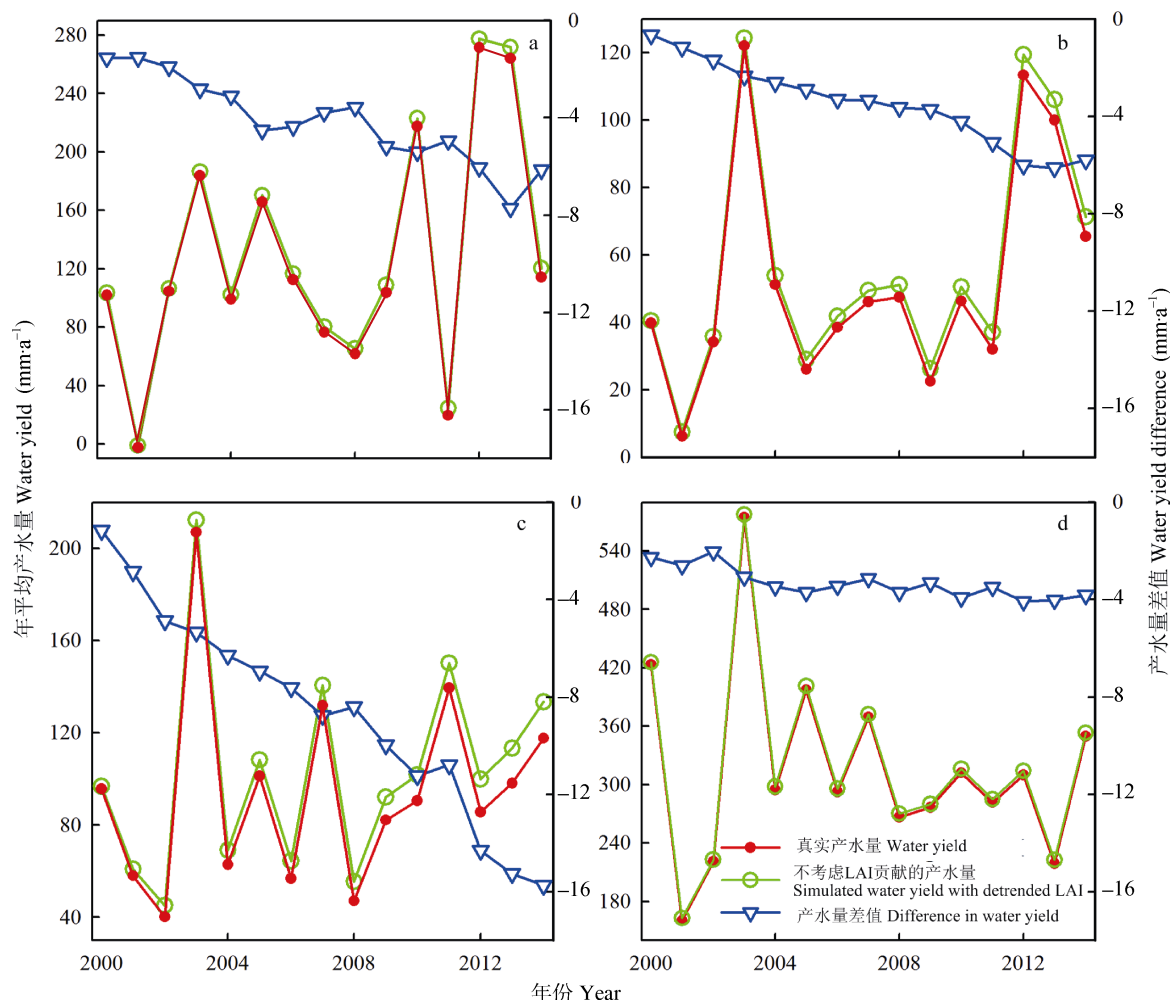


图 5 真实和不考虑 LAI 变化情况下北方地区产水量区域均值的变化趋势(a、b、c 和 d 依次为东北、北部、西北和黄淮海地区)

Fig. 5 Spatial-averages of actual water yield, simulated water yield with detrended LAI and their difference for the northern China during the period 2000–2014 (Fig. a, b, c, d are Northeast, North, Northwest and Huanghuaihai regions of China, respectively.)

化和城市化等所导致^[37-38]。本研究中采用基于 MODIS 反演的 2000—2014 年 LAI 定量评估北方地区 LAI 变化以及其对水循环的影响, 监测到 LAI 变化趋势与前人研究基本一致^[34,39]。本研究通过“去趋势”对 LAI 随时间升高或者降低的线性趋势予以去除而保留了其年际变化。通过原始 LAI 和去趋势 LAI 驱动生态过程模型分析了 LAI 变化对年蒸散和产水量的影响。

LAI 变化尤其是植树造林对产水量影响受到越来越多的关注。一些研究指出植树造林/再造林导致蒸散明显增加和径流减少^[40-42]。最近一项全球综合研究表明土地覆被变化对非湿润地区或保水能力差的流域影响较为明显^[9]。植树造林/再造林引起 LAI 变化并通过改变水文和能量循环等对气候变化予以反馈^[4]。本研究结果也表明植被 LAI 的变化对蒸散和产水量的影响在不同空间尺度上存在差异。评价 LAI 变化对蒸散和产水量的“净影响”需要考虑各种因素的作用。未来相关研究有必要将 LAI 变化所导致的蒸散及其他因子(如地表粗糙度、地表反照率)的变化对气候的反馈作用纳入进来。

在像元尺度 LAI 升高通常促进年蒸散量并减少产水量, 而 LAI 降低则减少年蒸散并促进产水量(图 3a-d); 两种情景模式下蒸散和产水量的差值在区域尺度上分别表现上升趋势和下降趋势, 这说明 LAI 升高对区域尺度蒸散产生正效应而对产水量存在负效应。另一方面, LAI 降低所引起的蒸散降低和产水量增加会部分抵消 LAI 升高对水循环的影响。这表明植树造林/再造林等导致的 LAI 变化对水循环的“净影响”取决于空间尺度范围。有关我国北方地区植树造林/再造林工程的可行性近年来颇受争议^[43-44]。一方面, 植树造林在提高森林覆盖率, 减少土壤侵蚀, 增强包括碳固定在内的生态系统服务功能等方面都起到了积极作用^[45]。另一方面, 植树造林/再造林会增加区域蒸散并降低产水量, 这将加剧我国北方干旱-半干旱地区的水资源短缺问题^[43]。我国近年来一直在推进生态系统恢复工程, 在 2050 年前中国森林覆盖率将达 26%^[46], 这些工程可能会对我国水循环过程产生更大影响。考虑到广大北方地区的缺水危机和 LAI 升高对产水量可能产生的负效应, 植树造林活动未来或许应该更多集中于降水更为充沛的南方地区。

3.2 结论

LAI 变化显著影响着陆地生态系统水循环。本研究基于生态过程模型和遥感数据探究了北方地区

LAI 变化对蒸散和产水量影响, 得出以下主要结论: 2000—2014 年间 LAI 发生显著变化的地区占北方地区面积的 20.2%, 其中 LAI 显著升高和降低地区面积分别占 18.8%和 5.5%。在像元尺度上, LAI 升高会促进蒸散并降低产水量, LAI 降低则相反。在区域尺度上, LAI 的升高分别对蒸散和产水量产生了显著的正负效应; LAI 变化对蒸散发和产水量影响取决于研究区范围和研究区内 LAI 升高和降低的比例。

参考文献 References

- [1] Xiao J, Moody A. Geographical distribution of global greening trends and their climatic correlates: 1982–1998[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(11): 2371–2390
- [2] De Jong R, De Bruin S, De Wit A, et al. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 692–702
- [3] Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1444–1449
- [4] Ellison D, Futter M N, Bishop K. On the forest cover-water yield debate: From demand- to supply-side thinking[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 806–820
- [5] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701–708
- [6] Andréassian V. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 291(1/2): 1–27
- [7] Brown A E, Zhang L, McMahon T A, et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 310(1/4): 28–61
- [8] Jackson R B, Jobb á gy E G, Avissar R, et al. Trading water for carbon with biological carbon sequestration[J]. *Science*, 2005, 310(5756): 1944–1947
- [9] Zhou G Y, Wei X H, Chen X Z, et al. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5918
- [10] Liu Y Q, Stanturf J, Lu H Q. Modeling the potential of the northern China forest shelterbelt in improving hydroclimate conditions[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1176–1192
- [11] Jiang B, Liang S L. Improved vegetation greenness increases summer atmospheric water vapor over northern China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(15): 8129–8139
- [12] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739–741

- [13] Zhang Y, Peng C H, Li W Z, et al. Multiple afforestation programs accelerate the greenness in the 'Three North' region of China from 1982 to 2013[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 404–412
- [14] 黄森旺, 李晓松, 吴炳方, 等. 近 25 年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 589–598
Huang S W, Li X S, Wu B F, et al. The distribution and drivers of land degradation in the three-north shelter forest region of China during 1982–2006[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 589–598
- [15] 杨存建, 刘纪远, 张增祥, 等. 遥感和 GIS 支持下的中国退耕还林还草决策分析[J]. *遥感学报*, 2002, 6(3): 205–211
Yang C J, Liu J Y, Zhang Z X, et al. Decision-marking on returning the dry upland to forest or grass land with support of GIS and remote sensing in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(3): 205–211
- [16] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 433–438
Yang W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 433–438
- [17] Li S, Xu M, Sun B. Long-term hydrological response to reforestation in a large watershed in southeastern China[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(22): 5573–5582
- [18] Liu W F, Wei X H, Liu S R, et al. How do climate and forest changes affect long-term streamflow dynamics? A case study in the upper reach of Poyang River Basin[J]. *Ecohydrology*, 2015, 8(1): 46–57
- [19] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, et al. Potential water yield reduction due to forestation across China[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3/4): 548–558
- [20] Xie X H, Liang S L, Yao Y J, et al. Detection and attribution of changes in hydrological cycle over the Three-North region of China: Climate change versus afforestation effect[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 203: 74–87
- [21] 刘扬, 韦志刚, 李振朝, 等. 中国北方地区降水变化的分区研究[J]. *高原气象*, 2012, 31(3): 638–645
Liu Y, Wei Z G, Li Z C, et al. Study on division of precipitation in northern China[J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(3): 638–645
- [22] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(2): 158–175
- [23] Chen J M, Liu J, Cihlar J, et al. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications[J]. *Ecological Modelling*, 1999, 124(2/3): 99–119
- [24] Liu J, Chen J M, Cihlar J. Mapping evapotranspiration based on remote sensing: An application to Canada's landmass[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(7): 1189
- [25] Chen J M, Chen X Y, Ju W M, et al. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 305(1/4): 15–39
- [26] Ju W M, Gao P, Wang J, et al. Combining an ecological model with remote sensing and GIS techniques to monitor soil water content of croplands with a monsoon climate[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1221–1231
- [27] Liu Y, Zhou Y, Ju W, et al. Evapotranspiration and water yield over China's landmass from 2000 to 2010[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(12): 4957–4980
- [28] Liu Y, Xiao J, Ju W, et al. Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13799
- [29] 张方敏, 居为民, 陈镜明, 等. 基于 BEPS 生态模型对亚洲东部地区蒸散量的模拟[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(9): 1596–1606
Zhang F M, Ju W M, Chen J M, et al. Study on evapotranspiration in East Asia using the BEPS ecological model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(9): 1596–1606
- [30] 柳艺博, 居为民, 陈镜明, 等. 2000—2010 年中国森林叶面积指数时空变化特征[J]. *科学通报*, 2012, 57(16): 1435–1445
Liu Y B, Ju W M, Chen J M, et al. Spatial and temporal variations of forest LAI in China during 2000–2010[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(16): 1435–1445
- [31] Deng F, Chen J M, Plummer S, et al. Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(8): 2219–2229
- [32] Friedl M A, Sulla-Menashe D, Tan B, et al. MODIS collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 168–182
- [33] Shangguan W, Dai Y J, Liu B Y, et al. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China[J]. *Geoderma*, 2012, 171–172: 85–91
- [34] Xiao J F. Satellite evidence for significant biophysical consequences of the "Grain for Green" program on the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(12): 2261–2275
- [35] Tian H Q, Melillo J, Lu C Q, et al. China's terrestrial carbon balance: Contributions from multiple global change factors[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(1): GB1007
- [36] Xiao J F, Zhou Y, Zhang L. Contributions of natural and human factors to increases in vegetation productivity in China[J]. *Ecosphere*, 2015, 6(11): 233
- [37] Li A, Wu J G, Huang J H. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: A critical application of RESTREND in inner Mongolia[J]. *Landscape Ecology*, 2012, 27(7): 969–982

- [38] 刘爽, 宫鹏. 2000—2010 年中国地表植被绿度变化[J]. 科学通报, 2012, 57(16): 1423–1434
Liu S, Gong P. Change of surface cover greenness in China between 2000 and 2010[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(16): 1423–1434
- [39] Chen B Z, Xu G, Coops N C, et al. Changes in vegetation photosynthetic activity trends across the Asia-Pacific region over the last three decades[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 144: 28–41
- [40] Yu P T, Krysanova V, Wang Y H, et al. Quantitative estimate of water yield reduction caused by forestation in a water-limited area in northwest China[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(2): L02406
- [41] Yao Y F, Cai T J, Ju C Y, et al. Effect of reforestation on annual water yield in a large watershed in northeast China[J]. Journal of Forestry Research, 2015, 26(3): 697–702
- [42] 刘贤赵, 谭春英, 宋孝玉, 等. 黄土高原沟壑区典型小流域土地利用变化对产水量的影响——以陕西省长武王东沟流域为例[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 99–102
Liu X Z, Tan C Y, Song X Y, et al. Impact of land use change on the water yield of typical small watershed in gully region at loess plateau — A case study from Wangdonggou watershed in Changwu, Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(4): 99–102
- [43] Cao S X. Why large-scale afforestation efforts in China have failed to solve the desertification problem[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(6): 1826–1831
- [44] Ma H, Lü Y, Li H X. Complexity of ecological restoration in China[J]. Ecological Engineering, 2013, 52: 75–78
- [45] Liu D, Chen Y, Cai W W, et al. The contribution of China's Grain to Green Program to carbon sequestration[J]. Landscape Ecology, 2014, 29(10): 1675–1688
- [46] 雷加富. 中国森林资源[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 172–173
Lei J F. Forest Resources in China[M]. Beijing: Chinese Forestry Publish House, 2005: 172–173